

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ALEKSANDRO STULGINSKIO UNIVERSITETAS

DARIUS ŽIŽYS

**AUTONOMINIŲ ENERGIJOS ŠALTINIŲ, VEIKIANČIŲ
AUKŠTESNIŲJŲ SKERSINIŲ VIRPESIŲ MODŲ REŽIMU,
TYRIMAS IR OPTIMIZAVIMAS**

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, mechanikos inžinerija (09T)

2018, Kaunas

Disertacija rengta 2013–2017 metais Kauno technologijos universiteto Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakulteto Mechanikos inžinerijos katedroje.

Mokslinis vadovas:

Prof. dr. Rimvydas GAIDYS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija, 09T).

Redagavo: Inga Nanartonytė (leidykla „Technologija“)

Mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Prof. habil. dr. Minvydas Kazys RAGULSKIS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija, 09T) – **pirmininkas;**

Doc. dr. Eric COURTEILLE (Reno nacionalinis taikomųjų mokslų institutas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija, 09T);

Prof. dr. Vytautas JÜRĖNAS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija, 09T);

Prof. habil. dr. Rimantas KAČIANAUSKAS (Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija, 09T).

Disertacija bus ginama viešame Mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje 2018 m. gegužės 17 d. 11 val. Kauno technologijos universiteto disertacijų gynimo salėje.

Adresas: K. Donelaičio g. 73-403, 44029 Kaunas, Lietuva.

Tel. + 370 37 300 042, faks. + 370 37 324 144, el. paštas doktorantura@ktu.lt

Disertacijos santrauka išsiųsta 2018 m. balandžio 17 d.

Su disertacija galima susipažinti interneto svetainėje <http://ktu.edu>, Kauno technologijos universiteto (K. Donelaičio g. 20, Kaunas) ir Aleksandro Stulginskio universiteto (Studentų g. 11, LT-53361 Akademija, Kauno r.) bibliotekose.

IVADAS

Darbo aktualumas

Pastaruoju metu išmanieji įrenginiai, tokie kaip mikroelektromechaniniai prietaisai (MEMS), labai išpopuliarėjo. Galima teigti, kad taip nutiko dėl poreikio kiek įmanoma sumažinti tokius įrenginius, kaip bevieliai jutikliai mazgai, struktūrų būklės jutikliai, žmogaus būklės jutikliai, mikrovaldikliai ir kt. Kol kas didžiausia tokių įrenginių problema yra energijos tiekimas. Dažniausiai juos aprūpinti energija iš išorinio šaltinio labai sunku arba net neįmanoma, o baterijos greitai išsenka ir jas tenka keisti. Taigi tyrėjai ėmė vystyti energijos generatorius, utilizuojančius atsinaujinančius energijos šaltinius, tokius kaip mechaniniai virpesiai, saulės, vėjo energija ir kt. Toks energijos generatorių panaudojimas tampa realus, nes dabartiniams MEMS įrenginiams, kurie yra mažesni nei 1 cm^3 , jau pakanka $100\ \mu\text{W}$ energijos. MEMS, bevelių jutiklių mazgų ir panašių įrenginių energijos sąnaudos svyruoja nuo $10\ \text{nW}$ iki $1\ \text{mW}$. Pripažįstama, kad šiuolaikiniais energijos generatoriais tokį energijos kiekį išgauti yra realu. Tobulėjant medžiagų mokslui jau įmanoma efektyviai išnaudoti žinomus energijos keitimo mechanizmus, kurie praeityje buvo pripažįstami kaip nepakankamai efektyvūs ir neatsiperkantys (fotovoltiniai, triboelektriniai, termoelektriniai, pjezoelektriniai ir t. t.). Kai kuriems iš šių energijos būvio keitimo mechanizmų reikia specialių sąlygų, pvz., tiesioginės saulės šviesos, didelio temperatūros skirtumo arba daug vietos ar tūrio (saulės elementai, vėjo jėgainės), būtent todėl mechaninė energija laikoma perspektyviausiu ir neišsenkamu energijos šaltiniu MEMS įrenginiams, ypač pramonėje, automobiliuose ir t. t.

Mechaninių virpesių energijai surinkti naudojami keli keitiklių tipai: elektrostatinis, elektromagnetinis bei pjezoelektrinis. Visi jie turi savų privalumų ir trūkumų, susijusių su dydžiu, efektyvumu, sudėtingumu; kai kurie reikalauja išorinio energijos tiekimo ar tam tikro virpesių dažnio ir kt. Iš minėtų keitiklių tipų pjezoelektrinis keitiklis pripažįstamas patraukliausiu: jis nereikalauja daug vietos, yra nesudėtingas ir efektyvus. Paminėtina tai, kad jo efektyvumas labai priklauso nuo žadinimo dažnio: pjezoelektriniai virpesių energijos keitikliai (PVEK) efektyviausi, kai žadinimo dažnis sutampa su tikriniu jų dažniu ir kai jie veikia rezonansiniu režimu. Tai labai riboja šių keitiklių panaudojimo galimybes, nes aplinkos virpesiai retai būna pastovaus dažnio – dažniausiai jie neprognozuojamai kinta. Šiems trūkumams įveikti buvo taikomos kelios strategijos: matematinis optimizavimas, skaitinių metodų taikymas keitikliui, virpančiam aukštesniųjų modų režimu, optimaliai segmentuoti, dažnį konvertuojančių keitiklių dinaminių parametų gerinimas.

Darbo tikslas

Šio tyrimo tikslas yra išanalizuoti ir išplėtoti skirtingas pjezoelektrinio virpesių energijos keitiklio (PVEK) energijos išgavos maksimizavimo metodikas, kurios leistų panaudoti aukštesniąsias virpesių modas ir užtikrinti efektyvų generatoriaus veikimą esant nepastoviam aplinkos žadinimui.

Darbo tikslui pasiekti suformuluoti šie **uždaviniai**:

1. Sukurti skaičiavimo technologiją, kuri padėtų optimaliai surinkti pjezoelektrinių elementų aukštesniųjų virpesių modų generuojamą energiją, iširti generuojamos energijos pasiskirstymą aktyviajame elemente.
2. Sudaryti virpesių energijos generatorių pjezoelektrinių elementų (grandžių) netiesinio dinaminio kontakto matematinį ir skaitinį modelius, iširti sudarytų modelių fizikinę elgseną esant vibrosmūginiam poveikiui.
3. Sukurti universalų susietąjį pjezoelektrinį elektrinės apkrovos modelį, iširti jo savybes ir pagrįsti šio modelio tinkamumą praktiniams skaičiavimams, skirtingų pjezoelektrinių elementų jungimo būdų įtaką generatoriaus dinaminiams bei elektriniams parametrams.
4. Nustatyti pjezoelektrinių elementų netiesinės dinaminės kontaktinės sąveikos mechaninius ir elektrinius parametrus ir išanalizuoti jų įtaką generatoriaus efektyvumui.
5. Sudaryti pjezoelektrinio elemento geometrinės formos, maksimizuojančios elemento generuojamą energiją, optimizavimo uždavinio matematinį ir skaitinį modelius, atlikti gautų rezultatų analizę ir verifikuoti sudarytus modelius eksperimentiškai.

Tyrimo objektas

Disertacijos tyrimo objektas yra pjezoelektrinis netiesinės dinaminės kontaktinės ar vibrosmūginės sąveikos virpesių energijos generatorius ir jo efektyvumo didinimas.

Tyrimo metodai

Pjezoelektrinių generatorių modeliai sudaryti baigtinių elementų metodu. Modeliai taikyti pjezoelementų netiesinei dinaminei kontaktinei sąveikai tirti, pjezoelemento geometrinei formai optimizuoti. Skaitiniams ir eksperimentiniams rezultatams apdoroti taikyti skaitinio diferencijavimo ir integravimo metodai, diskrečioji Furjė analizė. Skaičiavimams atlikti panaudota baigtinių elementų programinė įranga *COMSOL multiphysics* bei matematinių skaičiavimų programa *Matlab*. Modų analizės rezultatai buvo patikrinti naudojant *PRISM* holografą. Sudarytiems baigtinių elementų modeliams verifikuoti buvo pagaminti matavimo standai. Virpesių modos ir skersiniai poslinkiai nustatyti

naudojant skaitmeninę holografines interferometrijos principu veikiančią sistemą *PRISM*. Matavimų rezultatai fiksuoti osciloskopu *3425 USB*. Funkcijos generatorius *AGILENT 33220A* pasitelktas siekiant kontroliuoti harmoninio žadinimo signalą elektromagnetiniam vibratoriumi. Vienos ašies akcelerometras *METRA KS-93* pritvirtintas prie vibratoriaus apatinės dalies pagreičiui matuoti. PVDF bandiniams pjauti panaudota *PL10100 (Ekspla)* lazerinė sistema (Fizinių ir technologijos mokslų centre).

Ginamieji teiginiai

1. Sukurta ir išbandyta skaičiavimo technologija, padedanti optimaliai surinkti pjezoelektrinių elementų aukštesniųjų virpesių modų generuojamą energiją.
2. Sudaryti virpesių energijos generatoriaus pjezoelektrinių elementų ir grandžių netiesinio dinaminio kontakto matematinis ir skaitinis modeliai, nustatytos generatoriaus dinaminės charakteristikos, leidžiančios maksimizuoti generuojamos energijos kiekį.

Mokslinis naujumas

1. Sukurta nauja skaičiavimo metodika, leidžianti nustatyti optimalų segmentavimo tašką keitikliams, veikiantiems aukštesniųjų skersinių virpesių modų režimu. Pasiiekta 7 % didesnė generuojamos atvirosios grandinės įtampos amplitudės vertė.
2. Nustatyti optimalūs pjezoelektrinio dažnį konvertuojančio virpesių keitiklio, veikiančio netiesinio dinaminio kontakto sąlygomis, geometriniai ir elektriniai parametrai, leidžiantys generuojamą elektrinę galią padidinti 150 %. Nustatyta, kad didžiausia galia yra generuojama, kai dinaminio kontakto vieta sutampa su antrosios skersinių virpesių modos formos mazginiu poslinkių tašku.
3. Pritaikius optimizavimo metodą sukurta ir išbandyta pjezoelektrinio elemento geometrinės formos optimizavimo technologija, leidžianti generatoriaus efektyvumą pagerinti 16 %.

Praktinė vertė

Šiame moksliniame darbe sukurti konkretūs baigtinių elementų modeliai ir skaičiavimo technologijos galėtų būti pritaikomi aktualiems ir sudėtingiems pjezoelektrinių energijos generatorių vibrosmūginės kontaktinės sąveikos dinaminiais procesams tirti, padėti nustatyti optimalius parametrus, o tai leistų sumažinti eksperimentinių tyrimų skaičių ir kainą. Šie modeliai galėtų būti pritaikomi ir kitos fizikinės elgsenos energijos generatorių mechaninės sąveikos modelių sintezei.

Darbo apimtis

Darbą sudaro įvadas, keturi skyriai, išvados, 104 literatūros šaltinių sąrašas ir autoriaus publikacijų sąrašas. Disertacijos apimtis – 116 puslapių. Darbe pateikta 15 lentelių ir 83 iliustracijos.

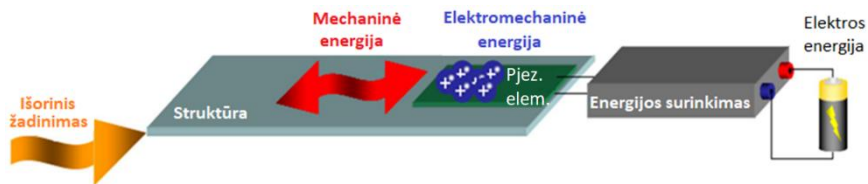
1. LITERATŪROS APŽVALGA

Tobulėjant medžiagų mokslui, anksčiau nepritaikomais ir neefektyviais laikyti energijos keitimo mechanizmai dabar jau plačiai naudojami MEMS ir mikroįrenginiuose. Mechaninė, ypač virpesių, energija buvo pripažinta kaip vienas patikimiausių energijos šaltinių MEMS įrenginiams. Pagrindiniai virpesių energijos keitimo į elektrinę mechanizmai – pjezoelektrinis, elektromagnetinis bei elektrostatinis efektai.

Elektromagnetiniams keitikliams paprastai reikalingi magnetai, ir tai, Suhaimi ir kt. [1, 2] teigimu, galima laikyti vienu didžiausių šio keitimo mechanizmo trūkumų, nes dėl to gerokai padidinamas keitiklio tūris. Kiti šio keitimo mechanizmo elementai yra ritė ir rezonuojantis aktyvusis elementas. Galimi du variantai: kai įtvirtinta yra ritė arba kai įtvirtintas yra magnetas; kitas elementas pakabinamas ant gembės. Magnetą gali keliauti išilgai arba skersai ritės. Zhu [3] teigimu, pirmasis variantas užtikrina geresnį elektromagnetinį susietumą. Elektromagnetinių keitiklių dydis gerokai apriboja jų veikimo dažnį – paprastai šis būna gana žemas.

Elektromagnetiniai keitikliai pasižymi gana didelėmis generuojamos srovės amplitudėmis, tačiau dėl to sumažėja įtampa. Šiems įrenginiams nereikalingi išoriniai energijos šaltiniai, tačiau generuojamos energijos dydis tiesiogiai priklauso nuo keitiklio dydžio. Zhu [3] įrodė, kad pereinant į mikromastelį tokių įrenginių efektyvumas gerokai sumažėja. Pagrindinis šio tipo keitiklių komponentas – kondensatorius, kurio plokštės elektriškai izoliuotos viena nuo kitos. Paprasčiausiu atveju, veikiant mechaninėms jėgoms, tarpelis tarp plokštelių kinta, taip keisdamas kondensatoriaus talpą. Tam, kad toks įtaisas generuotų energiją, plokštelėms reikia suteikti krūvį, taigi reikalingas išorinis energijos šaltinis. Šis keitimo mechanizmas gana plačiai aprašomas Beeby ir White'o [4]. Elektrostatiniai keitikliai paprastai skirstomi į du tipus: pastoviosios įtampos ir pastoviojo krūvio.

Patraukliausiu laikomas pjezoelektrinis energijos keitimo mechanizmas. Šis mechanizmas nereikalauja išorinių energijos šaltinių, pasižymi didžiausiu generuojamos energijos tankiu ir dinaminiu atsaku. Šio energijos keitimo mechanizmo principinė schema pateikta 1 pav.



1 pav. Pjezoelektrinio (elektromechaninio) energijos keitimo mechanizmo principinė schema [6]

Pjezoelektrinio energijos keitimo mechanizmo veikimo principas yra gana paprastas. Jis geriausiai aprašomas Sirohi ir Chopros [7] tyrime, kuriame pateikiamos nuoseklios mechaninės energijos keitimo į elektrinę lygtys. O fundamentalus medžiagų mechanikos aprašas pateikiamas Rezaeisaray’aus ir kt. darbe [8]. Šis keitiklis tvirtinamas ant mechaninius virpesius generuojančio kūno, taigi pastarajam virpant yra žadinamas ir keitiklis. Keitikliui virpant deformuojasi pjezoelektrinis elementas – generuojamas elektrinis krūvis surenkamas elektrodais, esančiais ant abiejų pjezoelemento pusių. Sugeneruoto ir surinkto elektrinio krūvio dydis yra tiesiogiai proporcingas pjezoelektrinio elemento deformacijoms, tad galima daryti išvadą, kad, norint maksimizuoti generuojamos energijos kiekį, reikia maksimizuoti deformacijų pjezoelektriniame elemente kiekį [9–11].

Paprasčiausias būdas maksimizuoti deformacijų kiekį yra žadinti keitiklį jo tikriniu dažniu – tokiu atveju keitiklis veiks rezonansiniu režimu. Keitikliui veikiant aplinkos virpesių dažnių diapazone, kuris atitinka jo pirmąją tikrinių virpesių modą, visas aktyviojo elemento paviršius dengiamas vientisu pjezoelektrinės medžiagos sluoksniu, tačiau jei keitiklis veikia aplinkos virpesių dažnių diapazone, atitinkančiame keitiklio antrąją ar aukštesniąsias tikrinių virpesių modas, kyla poreikis pjezoelektrinės medžiagos sluoksnį segmentuoti [10] dėl atsirandančio deformacijų mazginio taško, kuriame deformacijų laukas keičia ženklą. Naudojant vientisą pjezoelektrinės medžiagos sluoksnį, generuojami elektriniai krūviai panaikintų vienas kitą sukeldami didelius generuojamos energijos nuostolius [10]. Šios problemos sprendimas yra skirtingos poliarizacijos krypties pjezoelektrinių elementų naudojimas tam, kad bet kuriuo keitiklio veikimo momentu būtų generuojami to paties ženklo krūviai. Pjezoelektrinių elementų segmentavimui paskirta nemažai darbų. Erturkas ir kt. [6] teigė, kad pjezoelektrinius keitiklius, veikiančius aukštesniųjų skersinių virpesių modų režimu, geriausia segmentuoti taškuose, gautuose iš modų analizės sprendinio.

Egzistuoja fundamentalus santykis tarp keitiklio dydžio ir jo generuojamos energijos kiekio. Generuojama galia tiesiogiai proporcinga pridėtinės masės dydžiui ir kartu keitiklio poslinkių amplitudei, taigi mikroprietaisai generuos kur kas mažiau energijos nei makroprietaisai. Mažinant pjezoelektrinį keitiklį, didėja

jo rezonansinis dažnis, o tai yra nepageidaujamas efektas, nes pramonėje ir kitose srityse, kur tokie keitikliai reikalingi, aplinkos virpesių dažnis retai viršija 100 Hz. Siekiant įveikti šiuos ribojimus, buvo pasiūlyta daugybė metodų, leidžiančių pagerinti minėtų keitiklių efektyvumą. Vienas iš pavyzdžių – pasyvieji bei aktyvieji tikrinio dažnio derinimo mechanizmai, aprašyti Beeby ir White'o [4], leidžiantys pakeisti keitiklio tikrinį dažnį taip, kad šis sutaptų su aplinkos virpesių dažniu. Roundy [12] teigė, kad taikant aktyviuosius dažnio derinimo mechanizmus neįmanoma išgauti daugiau energijos, nei išievojama aktyviajam derinimo mechanizmui maitinti, tačiau Zhu [13] įrodė, kad ši prielaida yra klaidinga. Dažnio derinimo metodai gali būti tiek aktyvieji [14, 16], tiek pasyvieji [14, 16]. Literatūroje minimi ir kiti keitiklio standumo parametro keitimo metodai: elektrostatinis [17], pjezoelektrinis [18], magnetinis [19] arba terminis.

Tyrėjai pabrėžia netiesinių, dažnį konvertuojančių ir vibromūginių sistemų efektyvumą išgaunant energiją iš ypač žemo dažnio virpesių energijos šaltinių. Dažnį konvertuojančiuose keitikliuose energija dažniausiai surenkama žemadažnio rezonatoriaus. Šis, smūgiuodamas į aukštadažnę gembę (energijos keitiklį), perduoda jai kinetinę energiją ir indukuoja joje aukštojo dažnio virpesius, kurių dažnis atitinka jos savąjį dažnį. Kinetinė energija gali būti perduodama tiek mechaniniu smūgiu, tiek magnetinio perdavimo būdu. Šis keitiklio tipas gali būti patobulintas parenkant tinkamus dinaminis bei elektrinius sistemos parametrus ir taikant matematinę optimizavimą keitiklio dinaminiais parametrams gerinti.

2. AUTONOMINIŲ PJEZOELEKTRINIŲ ENERGIJOS KEITIKLIŲ MODELIAVIMAS

Šiame skyriuje pateikiami pasitelkti matematiniai modeliai. Kadangi pjezoelektriniai keitikliai dažniausiai yra paprasti strypai, jiems aprašyti pasitelkta Bernulio lenkiamo strypo teorija. Vadovaujantis tamprumo teorija, apkrauto strypo lygtis bus:

$$T = C^H S; \quad (1)$$

čia T – mechaniniai įtempiai, C^H – tamprumo matrica, S – deformacijos.

Mechaninės energijos keitimas į elektrinę pjezoelektriniame elemente išreikštas pasitelkus elektromechaninio keitimo mechanizmo lygtis. Elektromechaninio susietumo efektas pjezoelektrinėje medžiagoje gali būti išreikštas (2) ir (3) lygtimis:

$$T = C^P S - e E S, \quad (2)$$

$$D = e^T S + \varepsilon^S E S; \quad (3)$$

čia C^P – pjezoelektrinės medžiagos tamprumo matrica, D – elektriniai poslinkiai, e ir E – atitinkamai pjezoelektrinė matrica ir elektrinis laukas, ε^S – laidumo matrica.

Matematinių modelių diferencialinėms būvio lygtims spręsti buvo pasirinktas baigtinių elementų (BE) metodas, pasižymintis palyginti dideliu skaičiavimo efektyvumu bei patikimumu. Taikant BE metodą, deformuojamas kūnas diskretizuojamas baigtinio dydžio elementais – baigtiniais elementais, kurių poslinkiai, deformacijos ir pan. apskaičiuojami pagal deformuojamųjų kūnų mechanikos lygtis. Sudarytas skaitinis keitiklio modelis tirtas įvairiais aspektais – modų analizė pasitelkta siekiant apskaičiuoti keitiklio deformacijų ir skersinių poslinkių modų formas ir tikrinius dažnius (5). Būvio lygtis pateikta (4) formulėje.

$$M\ddot{u} + Ku = 0, \quad (4)$$

$$Kv = \omega_i^2 Mv. \quad (5)$$

Dinaminiai procesai, vykstantys keitikliui virpant, analizuoti pasitelkus dinaminių procesų analizę. Žadinimas kinematinis, jėga $f(t)$ išreikšta (7) lygtimi, šios jėgos dažnis sutampa su antruoju tikriniu aktyviojo elemento dažniu. Judesio lygtis pateikta (6) formulėje.

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = f(t), \quad (6)$$

$$f(t) = am \sin \omega_n t; \quad (7)$$

čia a – pagreitis, m – masė, ω_n – žadinimo dažnis, C – slopinimo matrica. Judesio lygtis išreiškia tiesinę dinaminę sistemą, kurios atsakas ir gaunamas išsprendus šią judesio lygtį.

Tiesioginis pjezoelektrinis efektas yra fizikinis reiškinys, kai tam tikrose medžiagose susidaro elektrinė poliarizacija šioms mechaniškai deformuojantis. Labai glaudžiai susijęs ir netiesioginis pjezoelektrinis efektas, kai medžiaga deformuojasi veikiamą elektrinio lauko. Energijos keitiklių projektavimas yra sudėtingas ir neįmanomas be šių jutiklių mechaninių bei elektrinių savybių matematinio modeliavimo. Susietasis pjezoelektrinės grandinės elektrinio lauko baigtinių elementų modelis (CPC-FEM) yra naudojamas keitiklio elektrinei galiai įvertinti. Šiuo atveju ypač svarbi kintamo dydžio elektrinės apkrovos įtaka keitiklio mechaninėms savybėms: virpesių amplitudei ir slopinimui, taip pat generuojamai įtampai, srovei ir elektrinei galiai. Šioje disertacijoje ypač daug dėmesio skirta tyrimui, kuriuo norėta išsiaiškinti, kaip išorinė elektrinė grandinė esant elektrinei apkrovai veikia keitiklio kuriamos elektrinės galios dydį, esant skirtingam dinaminiam darbo režimui.

Dažnio konvertavimo efektas paprastai išgaunamas žemadažniam rezonatoriui smūgiuojant į aukštadažnį energijos keitiklį. Mechaninio dviejų objektų kontakto neįmanoma patikimai modeliuoti neparinkus tinkamo

mechaninio, dinaminio kontakto modelio. Šiuo atveju pasitelktas ir aprašytas Hunto ir Crossley'aus modelis, kuris labiausiai tinka nagrinėjamam netiesiniam klampiai tampriam kontakto modeliui aprašyti. Dinaminis kontaktas tarp aukštadažnio pjezoelektrinio virpesių energijos keitiklio (PVEK) ir žemadažnio rezonatoriaus (ŽR) išreiškiamas per tampromo konstantą k_c ir slopinimo faktorių c_c . Tarpas tarp keitiklio ir rezonatoriaus žymimas z_{gap} . Kol $z_{gap} > 0$, tol k_c ir c_c neturi jokios įtakos sistemai. Išorinis mechaninės apkrovos vektorius F nusako mechaninį poveikį, tenkantį ŽR ir PVEK tandemui per dinaminį kontaktą ir kinematinį žadinimą, ir išreiškiamas (8) lygtimi:

$$(F) = \begin{cases} (F_k), p_{ls}(\dot{z}_{ls}, z_{ls}, t) \geq 0; \\ ((F_k) + (P_c(\dot{z}, z, t))), p_{ls}(\dot{z}_{ls}, z_{ls}, t) < 0; \end{cases} \quad (8)$$

čia (F_k) – kinematinio žadinimo jėga, $(P_c(\dot{z}, z, t))$ – netiesinio kontakto vektorius kontakto poroje, p_{ls} – kontakto poros netiesinės sąveikos jėga PVEK kontakto taške. Netiesinis kontaktas išreiškiamas (9) lygtimi:

$$P_c = k_c z^\alpha + c_c z^\alpha \dot{z}, \text{ kai } z < 0 \text{ ir } \dot{z} < 0; \quad (9)$$

čia k_c – kontakto standumo koeficientas, c_c – kontakto slopinimo koeficientas, α – jėgos eksponentė, priklausanti nuo kontakto paviršiaus geometrinės formos.

Iš skaitinių modelių gauti rezultatai buvo nagrinėjami pasitelkus skaitinius metodus – diskrečiąją Furjė transformaciją (DFT) ir Simpsono integravimo metodą. Aproximavimas pateiktas (10) lygtyje:

$$\int_0^L \frac{du}{dx} dx \approx \frac{h}{3} \left[\frac{d(u_0)}{dx} + 2 \sum_{j=1}^{\frac{N}{2}-1} \frac{d(u_{2j})}{dx} + 4 \sum_{j=1}^{N/2} \frac{d(u_{2j-1})}{dx} + \frac{d(u_N)}{dx} \right]; \quad (10)$$

čia u – poslinkiai ašine kryptimi išilgai aktyviojo elemento ilgio.

PVEK generuojamai elektros energijai maksimizuoti buvo pasitelkti matematiniai optimizavimo metodai, suformuluotas ir spęstas aktyviojo elemento geometrinės formos optimizavimo uždavinys įvertinant ekvivalentines statines apkrovas. Dinamikos lygtis redukuota ir transformuota į statinę apkrovą. Uždavinio tikslo funkcija išreiškiama (11) lygtimi. Kartu su ribojančių lygčių sistema: būvio lygtimi (12) ir keitiklio geometrinių parametų ribojimais (13):

$$\max Z = \int_0^L \left| \frac{du}{dx} \right| dx, \quad (11)$$

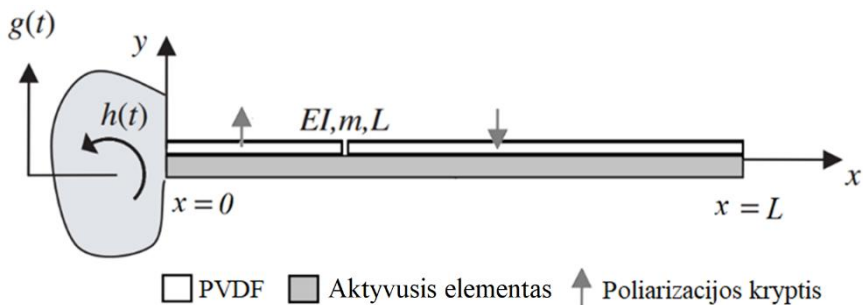
$$H_{min} \leq q_0 + q_1 x^1 + q_2 x^2 + q_3 x^3 \leq H_{max}, \quad (12)$$

$$[K]\{U\} = \{F\}; \quad (13)$$

čia Z – tampriosios deformacijos išilgai aktyviojo elemento ilgio, K – standumo matrica, U – poslinkių vektorius, F – išorinio poveikio jėgos faktorius.

3. AUTONOMINIŲ PJEZOELEKTRINIŲ ENERGIJOS KEITIKLIŲ SIMULIAVIMAS IR MODELIAVIMAS

Universalus susietasis pjezoelektrinio virpesių energijos keitiklio baigtinių elementų (BE) modelis pavaizduotas 2 pav. Modelis susietas su elektrine grandine, kuri leidžia įvertinti sugeneruotos įtampos dydį ir naudojamos elektrinės apkrovos įtaką PVEK dinaminiam parametrams.



2 pav. Pjezoelektrinio keitiklio schema

Tyrimui buvo pasirinkti du gembinio keitiklio tipai: tradicinis, pastovaus skerspjūvio ploto ir optimalios formos keitikliai. Pastarasis gautas minimizavus keitiklio masę, kai antrasis skersinių virpesių dažnis ω_2 lygus pastovaus skerspjūvio ploto keitiklio atitinkamam dažniui. Mechaninės ir geometrinės abiejų aktyviųjų elementų savybės pateiktos 1 lent., o pjezoelektrinės medžiagos savybės – 2 lent.

1 lentelė. Mechaninės ir geometrinės aktyviojo elemento savybės

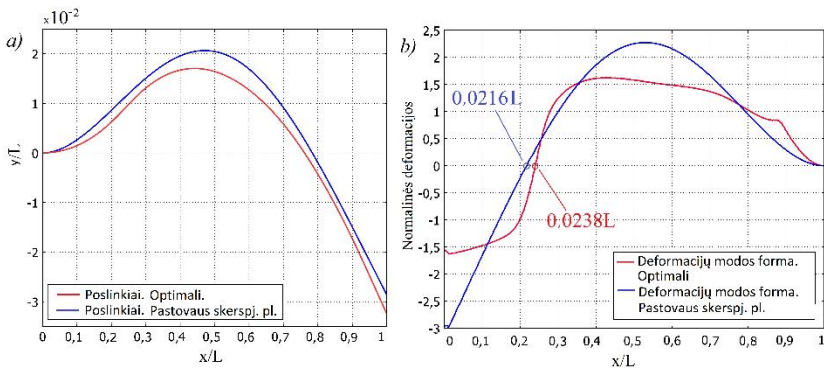
Parametras	Pastovaus skerspjūvio ploto aktyvusis el.	Optimalios formos aktyvusis el.
ω_1 , Hz	86	66
ω_2 , Hz	541	534
Tankis, kg/m ³		7850
Elastinis modulis, N/m ²		$2 \cdot 10^{10}$
Puasono sant.		0,33
Ilgis, m		0,1
Plotis a , m		0,01
Storis b , m	$1 \cdot 10^{-3}$	Kintanti forma nuo $4 \cdot 10^{-4}$ iki $1 \cdot 10^{-3}$

2 lentelė. PVDF savybės

Parametras	Pavadinimas	PVDF	Vienetai
d_{31}	Pjezoelektrinė deformacijų konst.	23	(pC/N)
g_{31}	Pjezoelektrinė įtempių konst.	216	(10^{-3} Vm/N)

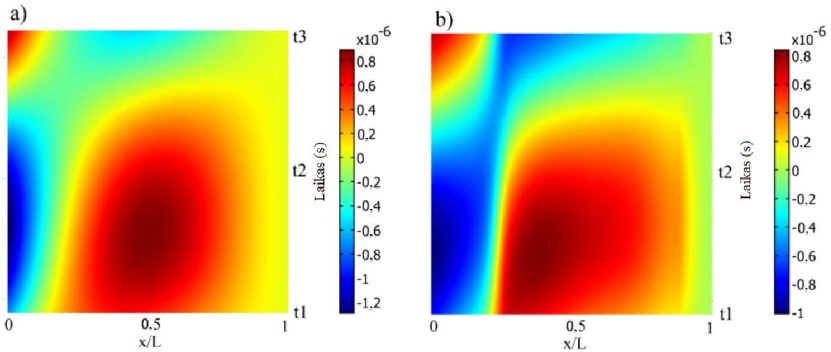
k_t	Elektromechan. susietumo fakt.	12 %	
C	Talpa	1,4–2,8	nF
Y	Jungo modulis	4	10^9 N/m ²
ε	Laidis	110	10^{-12} F/m
ρ	Masės tankis	1780	kg/m ³
t	Storis	64	μm

PVDF segmentuoti pasirinktas deformacijų mazginis taškas. Abiejų aktyviųjų elementų tikriniai dažniai gauti atlikus modų analizę. 3 pav. *a* dalyje pavaizduotos abiejų aktyviųjų elementų tipų antrosios skersinių virpesių modos, gautos atlikus modų analizę. 3 pav. *b* dalyje pavaizduotas išilginių deformacijų pasiskirstymas aktyviojo elemento viršutiniame sluoksnyje antroje skersinių virpesių modoje. Kadangi, kai aktyvusis elementas deformuojasi esant aukštesniosioms virpesių modoms, deformacijos aktyviojo elemento paviršiuje keičia ženklą, akivaizdu, kad vientisu elektrodu surenkant susidariusius krūvius šie panaikins vienas kitą ir gerokai sumažės surenkamų krūvių kiekis. Norint išvengti šių nuostolių, piezoelektrinius sluoksnius būtina segmentuoti taip, kad segmentavimo taškas tiksliai sutaptų su deformacijų mazginiu tašku.



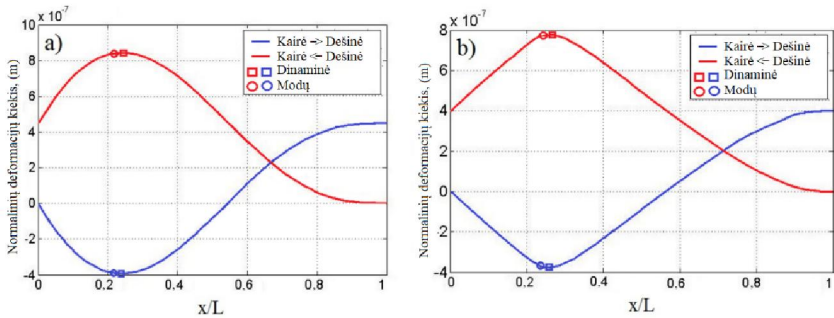
3 pav. Aktyviųjų elementų antrosios skersinių virpesių modos: a) poslinkiai; b) išilginės deformacijos

Deformacijų pasiskirstymui aktyviajame elemente tirti pasitelkta pereinamųjų procesų analizė. Tirtas keitiklio laisvojo galo pusperiodis žymimas $t1$, $t2$ ir $t3$. 4 pav. pateiktas abiejų aktyviųjų elementų tipų normalinių deformacijų laukas aktyviojo elemento ilgio (x/L) ir laiko ($t1-t3$) atžvilgiu. Matyti, kad deformacijos yra didesnės pastovaus skerspjūvio ploto aktyviajame elemente, tačiau bendras deformacijų vidurkis didesnis optimalios formos aktyviajame elemente. Be to, pastarajame neapibrėžtų deformacijų sritis yra siauresnė – tai lemia mažesnius deformacijų nuostolius toje zonoje ir apskritai.



4 pav. Normalinių deformacijų laukas aktyviojo elemento viršutiniame paviršiuje laiko intervale $\frac{1}{2}T$: a) pastovaus skerspjūvio ploto aktyvusis elementas; b) optimalios formos aktyvusis elementas

Skaitinei analizei naudota programinė įranga *Matlab*. Naudojant dinaminės analizės metu gautus duomenis, apskaičiuotas taškas, kuriame deformacijų vidurkis per tiriamą pusperiodį $\frac{1}{2}T$ (nuo $t1$ iki $t3$) lygus nuliui. Taškas apskaičiuojamas integruojant deformacijų pasiskirstymo aktyviojo elemento ilgyje L kreives laiko momentu t_i .



5 pav. Normalinių deformacijų kaupimas aktyviojo elemento ilgyje x/L per $\frac{1}{2}T$: a) pastovaus skerspjūvio ploto aktyviąjame elemente; b) optimalios formos aktyviąjame elemente

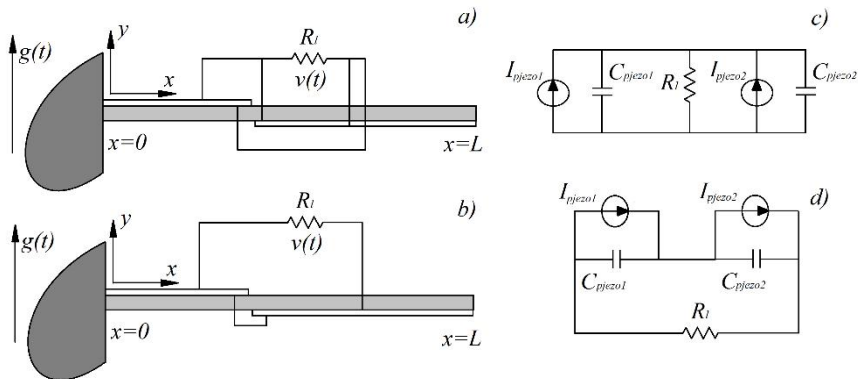
Normalinių deformacijų kiekio aktyviojo elemento paviršiuje integravimo rezultatai pateikti 5 pav. *a* ir *b* dalyse. Integravimas buvo atliktas iš abiejų aktyviojo elemento galų. Mėlyna kreivė vaizduoja integravimą nuo įtvirtinto aktyviojo elemento galo link laisvojo galo, raudona – atvirkščiai. Stačiakampis žymeklis 5 pav. (*a* ir *b*) žymi iš dinaminės analizės kreivių apskaičiuotą deformacijų maksimaliąją vertę, apskritas žymeklis – modų analizės metu gautą normalinių deformacijų mazginį tašką. Bendras normalinių deformacijų kiekis aktyviojo elemento ilgyje susideda iš dviejų dedamųjų – deformacijų kiekio

dešinėje ir kairėje pusėse nuo mazginio taško, šie du dydžiai atstoja dviejuose segmentuose sugeneruojamų deformacijų kiekius.

Pastovaus skerspjūvio ploto keitiklių segmentavus pereinamųjų procesų analizės metu gautame taške, bendras deformacijų prieaugis buvo 5,5 %, palyginti su rezultatais, gautais segmentuojant modų analizės metu gautame mazginių deformacijų taške. Optimizuotos formos deformacijų prieaugis atitinkamai buvo 5,2 %.

Toliau tirta pjezoelektrinių segmentų jungimo būdo (nuoseklusis arba lygiagrečiasis) įtaka aktyviojo elemento dinaminėms ir elektrinėms savybėms. Keitiklio modelis pavaizduotas 6 pav. PVEK buvo žadinamas harmoniniu žadinimu. Žadinimo dažnis sutapo su keitiklio antruoju tikriniu skersinių virpesių dažniu. PVEK segmentavimo taškas sutapo su anksčiau apskaičiuotu normalinių deformacijų mazginiu tašku.

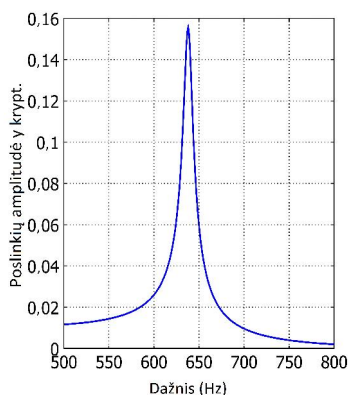
Pjezoelektriniai elementai gali būti modeliuojami kaip ekvivalentinė elektrinė grandinė, susidedanti iš srovės šaltinio I_{pjezo} , sujungta lygiagrečiai su kondensatoriumi C_i , kaip parodyta 6 pav. c ir d dalyse. Pjezoelektrinio elemento talpa C_p ir varža Z_p apskaičiuotos teoriškai.



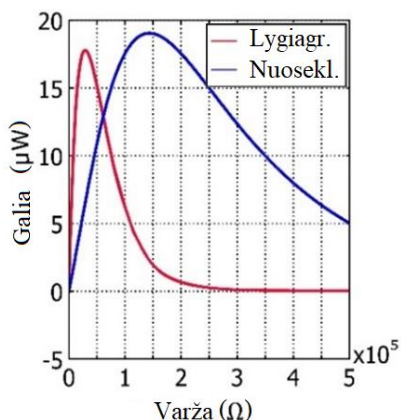
6 pav. PVEK su dviem PVDF sluoksniais, sujungtais: a) lygiagrečiai, b) nuosekliai. Ekvivalentinė elektrinė PVEK grandinė, sujungta: c) lygiagrečiai ir d) nuosekliai

Norint maksimizuoti generuojamą elektrinę galią, svarbu, kad pjezoelektrinių elementų vidinė varža sutaptų su elektrinės grandinės elektrine apkrova. Bendra pjezoelementų vidinė varža skirsis priklausomai nuo to, ar elementai bus sujungti lygiagrečiai, ar nuosekliai. Optimali elektrinė apkrova bus lygi ekvivalentinei abiejų PVDF elementų vidinei varžai. Apskaičiuota ekvivalentinė PVDF sluoksnių varža nuosekliajam jungimui yra $Z_{ps} = 127\ 168\ \Omega$, o lygiagrečiajam – $Z_{pp} = 29\ 355\ \Omega$. Esant nuosekliajam jungimui

ekvivalentinė varža yra tiesiog abiejų vidinių varžų suma: $Z_{pS} = Z_{p1} + Z_{p2}$, o esant lygiagrečiajam jungimui ji apskaičiuojama taip: $\frac{1}{Z_{pP}} = \frac{1}{Z_{p1}} + \frac{1}{Z_{p2}}$.



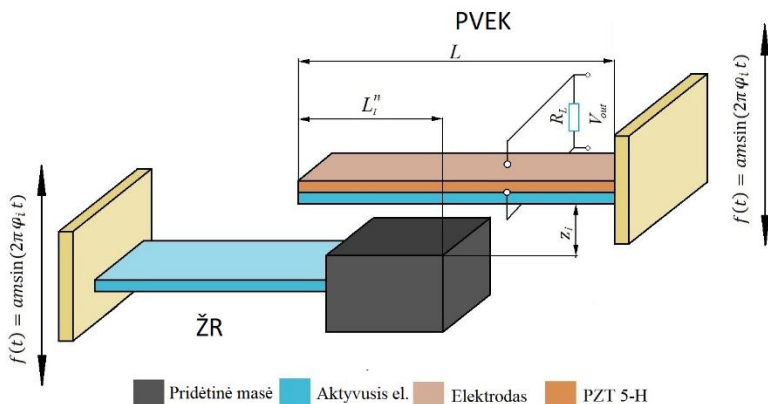
7 pav. Aktyviojo elemento laisvojo galo dažninė amplitudės charakteristika



8 pav. Nuosekliojo ir lygiagrečiojo jungimo generuojama galia keičiant el. apkrovos dydį

Dažninė amplitudės charakteristika pavaizduota 7 pav. 8 pav. parodytas keitiklio galios atsakas į kintantį elektrinės apkrovos dydį. Optimali apkrova lygiagrečiajam jungimui buvo 127 kΩ, o nuosekliajam jungimui – 29 kΩ. Rezultatai gerai sutampa su anksčiau teoriškai apskaičiuotomis pjezoelektrinių elementų vidinių varžų Z_{pP} ir Z_{pS} reikšmėmis. Atitinkamas jungimas gali būti pasirinktas, jei norima gauti didesnę įtampą arba srovę, tačiau akivaizdu, kad generuojamai elektrinei galiai jungimo tipas reikšmės neturi.

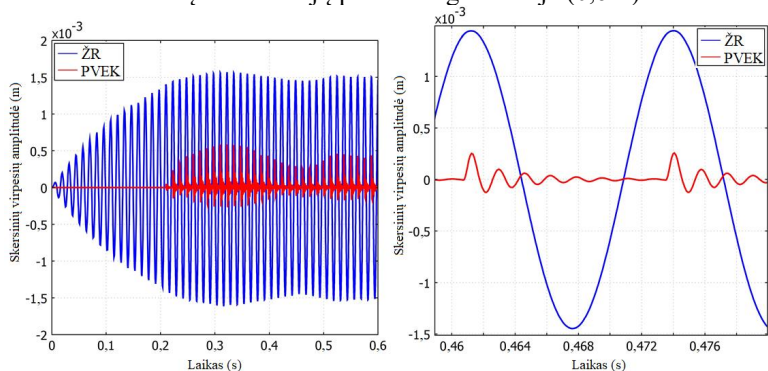
Toliau modeliuotas ir tirtas dažnį konvertuojantis energijos generatorius. Jis susideda iš žemadažnio rezonatoriaus (ŽR) ir aukštadažnio pjezoelektrinio virpesių energijos keitiklio (PVEK). Principinė šio įrenginio schema pateikta 9 pav. Tirtos kelios tandemų konfigūracijos su skirtingais ŽR ir PVEK tikrinių dažnių santykiais, kur PVEK tikrinis dažnis pastovus, ŽR tikrinis dažnis kintamas, keičiant pridėtinės masės dydį, $\omega_{1i}^{\text{ŽR}} = 311, 207, 155, 103, 77$ Hz, kur $i = 1, 5$. Dėl patogumo tekste toliau pateikiami aktyviojo elemento tikrinių skersinių virpesių dažnių santykiai: $\omega_1^{\text{PVEK}}/\omega_1^{\text{ŽR}} = 2; 3; 4; 6; 8$, kur ω_1^{PVEK} ir $\omega_1^{\text{ŽR}}$ yra atitinkamai PVEK ir ŽR pirmieji tikriniai skersinių virpesių dažniai. Šis tandemas buvo veikiamas harmoninio kinematinio žadinimo vertikaliąja kryptimi, dažniu φ_i , kuris sutampa su atitinkamu $\omega_{1n}^{\text{ŽR}}$. Aukštadažnis rezonatorius PVEK įtvirtintas virš ŽR atstumu z_l . Žemadažnis rezonatorius buvo žadinamas harmoniniu žadinimu. Sistemai pasiekus poslinkių vertikaliąja kryptimi amplitudės dydį, lygų z_l , įvyko vibrosmūginis kontaktas tarp PVEK ir ŽR.



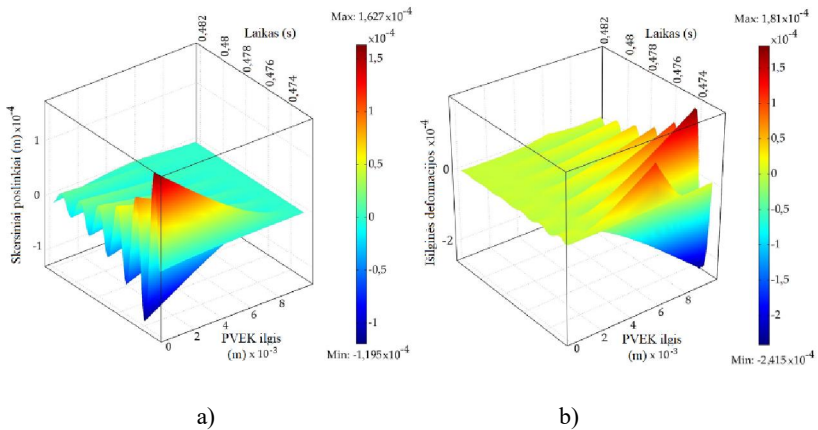
9 pav. Tandemo tipo energijos keitiklio principinė schema

Netiesiniam viskoelastiniam kontaktui modeliuoti pasitelktas Hunto ir Crossley'aus kontakto modelis. Tandemas tirtas keičiant kontakto poziciją L_i^n (kur $n = \overline{0,6}$, žingsniu 0,1 L matuojant nuo laisvojo PVEK galo). 10 pav. pateiktas laisvojo PVEK galo dinaminis atsakas, atitinkantis dažnių santykį $\omega_1^{PVEK} / \omega_1^{\check{Z}R} = 8$ (kontaktas taške 0,5 L). Iš 10 pav. matyti, kad virpesių amplitudė „pulsuoja“, nes vykdo periodinis pasikeitimas kinetine energija tarp ŽR ir PVEK.

11 pav. pateikta to paties proceso analizė per visą PVEK ilgį, kartu pateikiant ir normalinių deformacijų pasiskirstymą laiko intervale, atitinkančiame vieną ŽR virpesių periodą. Iš 11 pav. matyti, kad normalinių deformacijų vertės didžiausios ties keitiklio įvirtinimo tašku (1 L), nors aiškiai matomas ir normalinių deformacijų pikas smūgio vietoje (0,6 L).

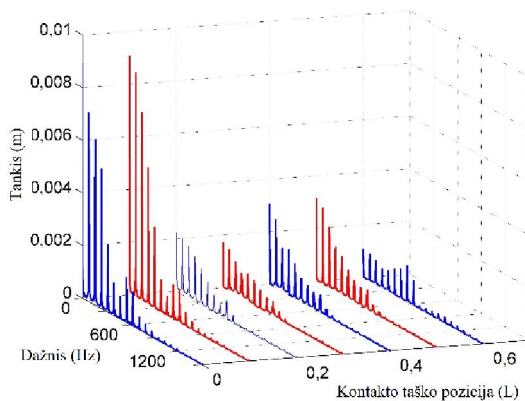


10 pav. ŽR (mėlyna spalva) ir aukštadažnio PVEK (raudona spalva) laisvojo galo skersiniai poslinkiai. Kontakto taškas $L_i^n = 0,5$ L PVEK ilgio ir dažnių santykis $\omega_1^{PVEK} / \omega_1^{\check{Z}R} = 8$



11 pav. PVEK pereinamasis procesas nuo smūgio iki visiško virpesių nuslopimo (ŽR – 103 Hz, kontakto taškas 0,6 L): a) skersiniai poslinkiai, b) normalinių deformacijų pasiskirstymas išilgai PVEK ašies

Skaitiniai pereinamojo proceso modeliavimo rezultatai apdoroti programine įranga *Matlab*. PVEK atsakas yra ŽR žadinimo dažnio ir PVEK atsako, kuris lygus jo tikriniam skersinių virpesių dažniui (622 Hz), superpozicija. Gautas dažnių tankio spektras pavaizduotas 12 pav. Esant dideliame dažnių skirtumui ($\omega_1^{PVEK}/\omega_1^{\check{Z}R} = 8$), nėra aiškiai vyraujančio dažnio, veikiau platus vyraujančių dažnių spektras. Šiuos dažnius rodančių spektro smailių skaičius ir jų amplitudės mažėja kontakto taškui slenkantis link įtvirtinimo vietos (0 L → 0,6 L).



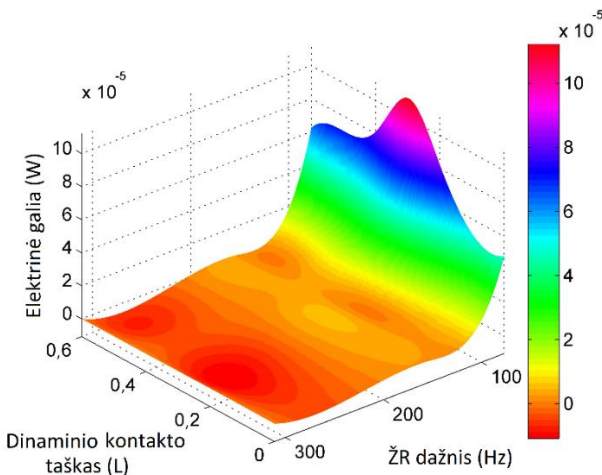
12 pav. ŽR ir PVEK tandemo DFT analizė skirtinguose dinaminio kontakto taškuose ir esant skirtingiems dažnių santykiams $\omega_1^{PVEK}/\omega_1^{\check{Z}R} = 8$

Modeliuojant gautos įtampos reikšmės perskaičiuotos į vidutinės kvadratinės šaknies (RMS) reikšmes. Ištyrus PVEK generuojamos RMS elektrinės galios priklausomybę nuo dinaminio kontakto tarp PVEK ir ŽR vietos ir elektrinės apkrovos dydžio, nustatyta, kad generuojamos galios pikai visuose kontakto taškuose buvo tarp 28 kΩ ir 31 kΩ. Optimalūs elektrinių apkrovų dydžiai esant skirtingoms tandemio konfigūracijoms pateikti 3 lent. Optimalūs elektrinių apkrovų dydžiai kinta priklausomai nuo kontakto vietos: kuo arčiau laisvojo PVEK galo – tuo didesnė apkrova reikalinga.

3 lentelė. Optimali elektrinė apkrova [kΩ] esant skirtingoms LRF ir PVEK tandemio konfigūracijoms

	$\frac{\omega_1^{PVEH}}{\omega_1^{LFR}}$	Dinaminio kont. atstumas nuo PVEK laisvojo galo						
		0 L	0,1 L	0,2 L	0,3 L	0,4 L	0,5 L	0,6 L
Opt. elektrinė apkrova R_L, [kΩ]	8	31	30,5	29,5	29,5	29	29	29
	6	31	30,5	29,5	29	29	29	28,5
	4	31	30	30	29,5	29	29	28,5
	3	31	30,5	30	30	29	29	28,5
	2	30,5	30	29,5	29,5	29	29	28,5

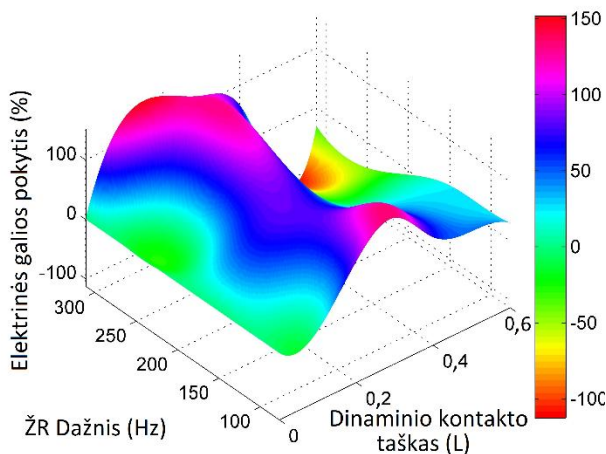
Iš 13 pav. matomos generuojamos galios RMS reikšmės skirtingose dinaminio kontakto vietose su elektrinėmis apkrovomis R_L , garantuojančiomis didžiausią generuojamą galią. Iš gautų rezultatų matyti, kad didžiausia galia generuojama, kai kontakto vieta yra nuo 0,2 L iki 0,3 L atstumu nuo laisvojo PVEK galo, taip pat kuo žemesnis ω_1^{ZR} – tuo didesnė PVEK generuojama elektrinė galia.



13 pav. Sugeneruota RMS galia skirtingose tandemio konfigūracijose ir kontakto taškuose su optimaliomis elektrinėmis apkrovomis R_L

RMS galios, sugeneruotos žadinant ŽR skirtingais dažniais, kiekybiniam palyginimui buvo parinktas efektyvumo kriterijus, eliminuojantis dažnio įtaką keitiklio RMS galiui. Nustatyta, kad net ir normalizavus RMS galios reikšmes dažnių atžvilgiu didesnę RMS galią generuoja konfigūracijos, kuriose $\omega_1^{PVEK} / \omega_1^{\dot{Z}R}$ santykis didesnis.

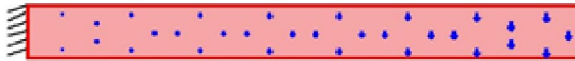
Skirtumas tarp RMS galios, sugeneruotos konfigūracijų su dažnių santykiais $\omega_1^{PVEK} / \omega_1^{\dot{Z}R} = 8$ ir 6 , kai kontakto taškas $0,3$ L, buvo 306% , o su dažnių santykiais $\omega_1^{PVEK} / \omega_1^{\dot{Z}R} = 6$ ir 4 , kai kontakto taškas $0,3$ L, – 402% . Panašūs skirtumai buvo tarp visų lygintų dažnių santykių lyginant tuos pačius kontakto taškus. Išilgai PVEK ilgio kintančio kontakto taško vietos įtakai generuojamos galios dydžiui palyginti reikšmės, gautos skirtinguose dinaminio kontakto taškuose (nuo $0,1$ L iki $0,6$ L aktyviojo elemento ilgio), palygintos su galia, sugeneruota smūgiuojant į laisvąjį PVEK galiuką (0 L). Lyginami buvo tik tokio paties dažnių santykio duomenys. Rezultatai pateikiami 14 pav. Kaip matyti iš šio paveikslėlio, esant aukštesniam ŽR tikriniam ir žadinimo dažniui, taškas, kuriame generuojama didžiausia galia, po truputį slenkasi link laisvojo PVEK galiuko. Kai dažnių santykis $\omega_1^{PVEK} / \omega_1^{\dot{Z}R}$ yra 6 ir 4 , didesnė galia generuojama kontakto vietai esant apie $0,2$ L, tačiau, kontakto vietai tolstant link įtvirtinimo vietos, generuojama galia keliasdešimt ar keliolika procentų didesnė nei generuojama smūgio į PVEK laisvąjį galą (0 L). Kai dažnių santykis $\omega_1^{PVEK} / \omega_1^{\dot{Z}R}$ yra 3 ir 2 , kontakto vietai esant arčiau įtvirtinimo vietos ($0,5$ L ir $0,6$ L), generuojama 110% mažiau galios nei tada, kai smūgiuojama į PVEK laisvąjį galą (0 L). Tai galima susieti su ŽR kinetinės energijos kiekiu, reikalingu PVEK deformuoti.



14 pav. Skirtingose kontakto vietose ir smūgio į PVEK galiuką sugeneruotos galios palyginimas proc. išraiška

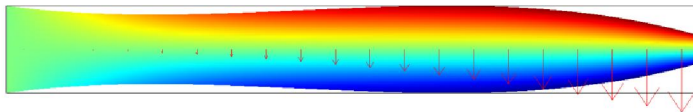
Siekiant sugeneruoti didžiausią galią, kontakto taškas turėtų būti nuo 0,2 L iki 0,3 L. Tai galima aiškinti antrąja skersinių virpesių modos forma, kuri dirbtinai sužadinama smūgiuojant į aktyviojo elemento antrosios skersinių virpesių modos mazginį tašką (0,216 L).

Paskutiniame modelyje nagrinėjamas keitiklio geometrinės formos optimizavimo uždavinys. Šio uždavinio tikslas – maksimizuoti keitiklio tampriųjų deformacijų kiekį jo paviršiuje, veikiant išoriniam poveikiui ekvivalentiškam kinematiniam žadinimui ir esant geometrinių keitiklio parametrų (šiuo atveju keitiklio storio) ribojimams. Tampriųjų deformacijų maksimizavimas aktyviojo elemento paviršiuje garantuos didesnę generuojamos elektros energijos kiekį, nes pjezoelektrinio sluoksnio deformacijos tiesiogiai proporcingos jo generuojamam krūviui. Keitiklio geometriniai parametrai apriboti siekiant išvengti perteklinio aktyviojo elemento ploninimo ar storinimo optimizavimo procedūros metu. Aktyviojo elemento pradinė geometrinė forma parodyta 15 pav.



15 pav. Optimizuojamo aktyviojo elemento pradinė geometrinė forma ir iškirstytoji apkrova

Matematinis optimizavimo uždavinio modelis realizuotas BEM analizės sistemoje *COMSOL*. Gautoji optimali aktyviojo elemento geometrinė forma, maksimizuojanti tampriąsias deformacijas viršutiniuose aktyviojo elemento paviršiuose, pateikta 16 pav.



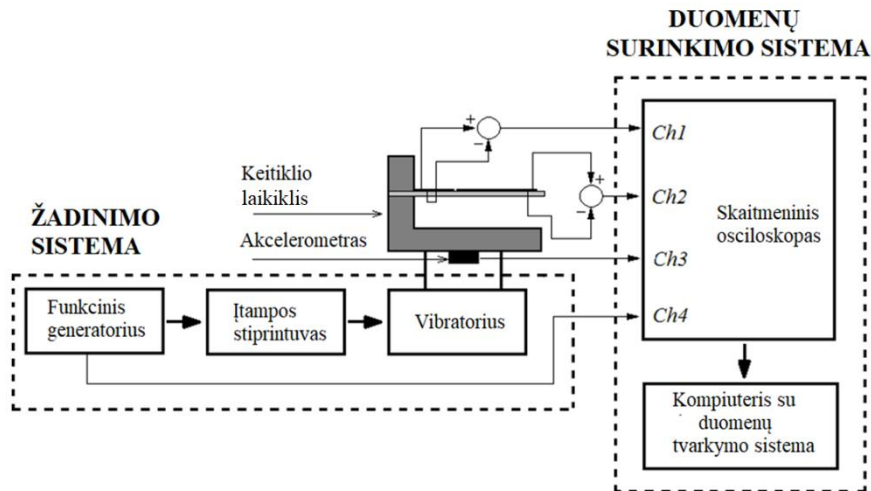
16 pav. Pradinė aktyviojo elemento forma ir optimali forma, deformacijų laukas

Atlikus modų analizę rastos optimalios formos aktyviojo elemento modos. Pirmasis tikrinis optimalios formos aktyviojo elemento dažnis $\omega_1 = 50$ Hz, o pirminės formos aktyviojo elemento dažnis $\omega_1 = 66$ Hz. Antrasis tikrinis optimalios formos aktyviojo elemento dažnis $\omega_2 = 369$ Hz, o pirminės formos aktyviojo elemento dažnis $\omega_2 = 389$ Hz. Aktyviojo elemento pereinamojo proceso analizė atlikta laikant, kad išorinis poveikis $f(t)$ atitinka pirmąją skersinių virpesių modą.

Palyginus sugeneruotų deformacijų reikšmes gauta, kad optimalios formos aktyvusis elementas sugeneravo 16 % daugiau deformacijų.

4. EKSPERIMENTINIS VERIFIKAVIMAS

Pjezoelektrinio virpesių energijos keitiklio modelio su dviem pjezoelektrinės medžiagos elementais, segmentuotais modų ir pereinamųjų procesų analizės metu gautuose taškuose, validumas patikrintas eksperimentu. *PVDF DTI-028K* (*Measurement Specialities Inc. Hampton*) bandiniai buvo pjaustomi iki reikiamo ilgio pikosekundiniu lazeriu *PL10100* (*Ekspla*). Darbai atlikti Fizinių ir technologijos mokslų centre (Vilnius).

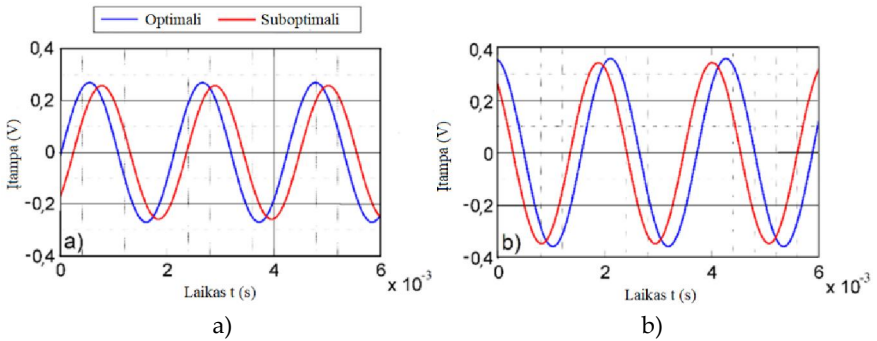


17 pav. Eksperimento principinė schema

Eksperimento principinė schema, pateikta 17 pav., sudaryta iš energijos keitiklio ir dviejų prie jo prijungtų sistemų: žadinimo sistemos bei duomenų surinkimo sistemos. Keitiklio laikiklis pritvirtintas prie elektromagnetinio žadinimo įtaiso, kuris harmoniniu žadinimu žadina keitiklį.

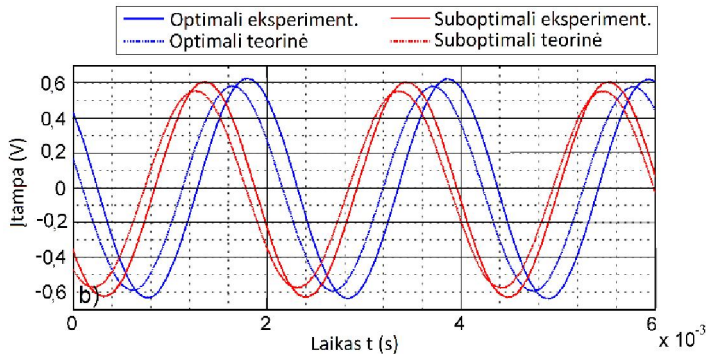
Bandymams buvo naudojami dviejų tipų aktyvieji elementai – optimalios formos ir pastovaus skerspjūvio ploto. Iš viso tirti keturi bandiniai, abiejų tipų aktyvieji elementai segmentuoti deformacijų mazginiuose taškuose, gautuose atlikus modų analizę (optimalios formos aktyviajam elementui – 0,239 L, pastovaus skerspjūvio ploto aktyviajam elementui – 0,216 L) ir dinaminę analizę (optimalios formos aktyviajam elementui – 0,259 L, pastovaus skerspjūvio ploto aktyviajam elementui – 0,238 L).

18 pav. *a* ir *b* dalyse pateiktos išmatuotos optimalios formos keitiklių įtampos reikšmės esant atvirosios grandinės režimui. Matoma, kad visais tirtais atvejais segmentuojant pereinamųjų procesų analizės metu gautame deformacijų mazginiame taške generuojama nuo 8 iki 10 % daugiau įtampos nei segmentuojant modų analizės metu gautame deformacijų mazginiame taške.



18 pav. Atvirosios grandinės įtampa, optimalios formos keitiklis ($\omega_2 = 551$ Hz):
a) pirmasis segmentas; b) antrasis segmentas

19 pav. pateikiamas teoriškai ir eksperimentiškai gautų atvirosios grandinės įtampų palyginimas. Optimalios formos aktyviajame elemente įtampos vertė gauta segmentuojant apskaičiuotame normalinių deformacijų mazginiame taške (segmentavimo linija 0,026 m, 0,536 V). Segmentuojant mazginiame taške, gautame atlikus modų analizę (0,024 m), įtampa 0,511 V.

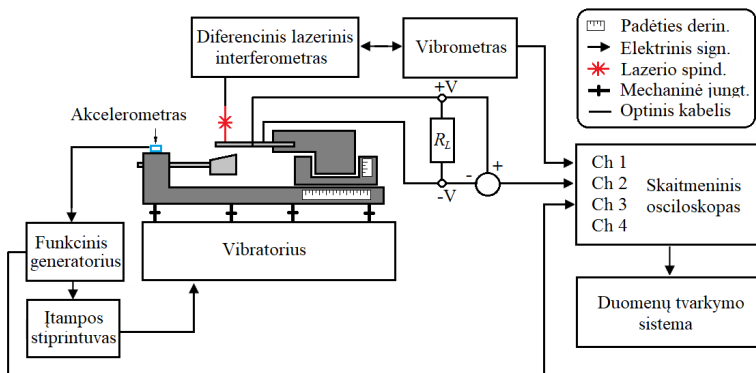


19 pav. Eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimas susumavus abiejuose segmentuose sugeneruotas įtampas (kanalas 1 + kanalas 2) optimalios formos aktyviajame elemente

Modų analizės metu gauti aktyviųjų elementų tikriniai dažniai buvo patikrinti holografijos eksperimentu, matuojant virpesių amplitudes skersinių poslinkių kryptimi, šias žadinant jų pirmuoju bei antruoju tikriniais skersinių virpesių dažniais. Aktyviųjų elementų virpesių amplitudės y kryptimi, gautos iš holografinių interferencinių vaizdų, buvo palygintos su *COMSOL Multiphysics* programa gautais rezultatais. Palyginus iš interferencinių vaizdų ir skaitiniais metodais gautus rezultatus, nustatyta, kad mazginių poslinkių taškų vietos ir

amplitudės gerai sutampa ir kad holografijos metodu gauti skersinių poslinkių amplitudžių maksimumai, atitinkantys tikrinius dažnius, maždaug 3 % tikslumu atitinka apskaičiuotus tikrinius dažnius.

Atskiru eksperimentu buvo verifikuojamas sudarytasis dažnį konvertuojančio pjezoelektrinio dviejų aktyviųjų elementų energijos keitiklio BE modelis. Eksperimento principinė schema pateikta 20 pav.



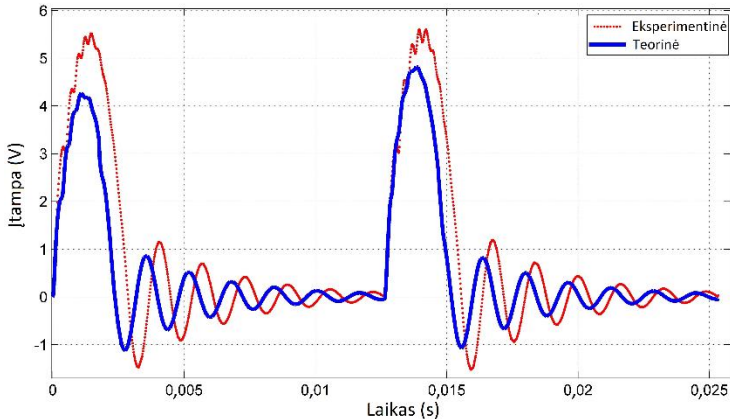
20 pav. Eksperimento principinė schema

Žemadažnis rezonatorius (ŽR) buvo pagamintas iš plieno su pridėtine mase aktyviojo elemento gale, leidžiančia keisti ŽR tikrinį dažnį. Aukštadažnis pjezoelektrinis virpesių energijos keitiklis pagamintas iš nerūdijančio plieno, pjezoelektrinės medžiagos PZT-5H sluoksnis priklijuotas ant PVEK viršutinio paviršiaus. Poslinkiai išmatuoti Doplerio vibrometru (*OFV-512* diferencinis lazerinis interferometras, *Polytec*, Valdbronas, Vokietija) su *Polytec OFV-5000* valdikliu (*Polytec*, Valdbronas, Vokietija). Žemadažnis rezonatorius kinematiškai žadintas elektromagnetiniu vibratoriumi. Signalas kontroliuotas *33220A* funkcinio generatoriumi (*Keysight*, Santa Klara, JAV), signalui stiprinti panaudotas *VPA2100MN* įtampos stiprintuvas (*HQ Power*, Gaverė, Belgija). Vienos ašies akcelerometras pritvirtintas prie akrilinio stiklo gembės tvirtinimo stendo, o šis savo ruožtu buvo pritvirtintas prie elektromagnetinio vibratoriaus žadinimo amplitudei matuoti (*KS-93*, jautrumas $0,35 \text{ mV}/(\text{m/s}^2)$). Matavimų rezultatai fiksuoti osciloskopu *3425 USB*. ŽR montuotas prie stendo taip, kad negalėtų būti judinamas, o PVEK laikiklis galėjo būti judinamas horizontaliai ir vertikaliai tarpeliui tarp PVEK ir ŽR suderinti ir dinaminio kontakto taškui atitinkamai keisti. Visa ši struktūra sumontuota ant elektromagnetinio vibratoriaus.

Pirmojoje šio eksperimento dalyje buvo tiriamas dinaminis PVEK atsakas esant vibromūginiam žadinimui atvirosios grandinės režimu ($R_L = 10 \text{ M}\Omega$). Įtaisas buvo žadinamas 77 Hz dažniu, atitinkančiu fundamentalųjį ŽR dažnį. ŽR

smūgiuojant į PVEK sužadintų virpesių dažnis dėl dažnio konvertavimo efekto atitiko fundamentalųjį PVEK dažnį – 622 Hz.

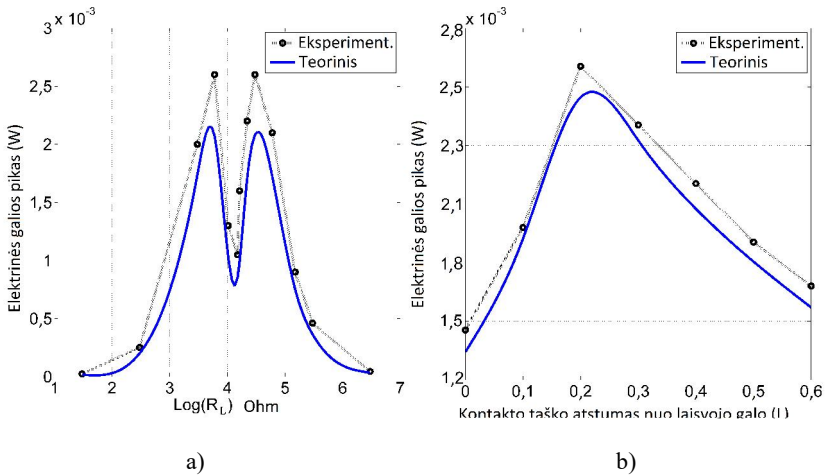
Esant šiems dinaminiais parametrams eksperimentiškai gauta įtampos ir laiko charakteristika kartu su modeliavimo rezultatais parodyta 21 pav.



21 pav. Eksperimentiškai ir skaitiniais metodais gautos atvirosios grandinės PVEK generuojamos įtampos reikšmės, ŽR žadinimo dažnis 77 Hz, dinaminio kontakto taškas 0,2 L

21 pav. pateiktas dinaminio proceso intervalas, paimtas iš nusistovėjusių virpesių ruožo. Raudona kreivė rodo eksperimentiškai gautus duomenis, mėlyna – rezultatus, gautus skaitiniais metodais. Skirtumas tarp eksperimentinių ir skaitiniais metodais gautų rezultatų yra apie 5 %. Iš eksperimentinių duomenų taip pat aiškiai matyti pakartotiniai ŽR smūgiai į PVEK (tai rodo raudonos kreivės banguotumas šiai esant pike). Taip pat matyti, kad smūgio trukmė eksperimente buvo šiek tiek ilgesnė nei modeliuojant, tai galima aiškinti mažesniu ŽR tikriniu dažniu eksperimente ar slopinimo koeficiento reikšmių skirtumais eksperimente ir skaitiniame modelyje. Nepaisant šių skirtumų, modelių atitikimas yra geras.

22 pav. *a* dalyje pateikiami eksperimentiškai ir skaitiniais metodais gauti keitiklio generuotos elektrinės galios maksimumai, kaip elektrinės apkrovos esant harmoniniam ir vibrosmūginiam žadinimui funkcija, kai dinaminio kontakto vieta – 0,2 L, savųjų dažnių santykis $\omega_1^{PVEK}/\omega_1^{\dot{Z}R} = 8$. 22 pav. *b* dalyje pavaizduota keitiklio sugeneruotos elektrinės galios priklausomybė nuo dinaminio kontakto taško pozicijos, kai tikrinių dažnių santykis $\omega_1^{PVEK}/\omega_1^{\dot{Z}R} = 8$, elektrinės apkrovos dydis $R_L = 29,5 \text{ k}\Omega$. 22 pav. *a* dalyje elektrinių apkrovų reikšmės horizontaliojoje ašyje pateikiamos logaritminiu masteliu, tad matyti, kad du kreivės maksimumai yra ties $\sim 6,5 \text{ k}\Omega$ ir $\sim 31 \text{ k}\Omega$.



22 pav. Eksperimentiškai ir skaitiniais metodais gauti keitiklio (dažnių santykis $\omega_1^{PVEK}/\omega_1^{ZR} = 8$) sugeneruotos elektrinės galios maksimumai kaip funkcijos: a) elektrinės apkrovos esant sinusoidiniam ir vibrosmūginiam žadinimui, dinaminio kontakto vieta – 0,2 L; b) dinaminio kontakto taško vieta su elektrine apkrova $R_L = 29,5 \text{ k}\Omega$

Skaitiniais metodais gauti rezultatai gerai atitinka eksperimentinius. Dviguba viršūnė elektrinės galios priklausomybės nuo elektrinės apkrovos dydžio kreivėje gali būti aiškinama elektrinio rezonanso ir antirezonanso efektu, kurio ir tikimasi iš pjezoelektrinės medžiagos, pasižyminčios dideliu elektromechaninio susietumo koeficientu. Rezultatai rodo, kad eksperimentiškai gauti rezultatai buvo 15 % didesni, nei prognozuota, tai galima aiškinti slopinančių ar kitų veiksnių pervertinimu modelyje. Eksperimentinių ir modeliavimo rezultatų atitikimas yra tenkinantis, nes neviršija 8 %. Rezultatai, grafiškai pavaizduoti 22 pav. b dalyje, taip pat gerai atitinka 13 pav. pateiktus rezultatus. Iš šių duomenų taip pat matyti, kad didžiausia RMS elektrinė galia sugeneruota kontakto vietai esant 0,2–0,3 L.

Teoriniai rezultatai gali būti laikomi tiksliais tik patvirtinus tai eksperimentiškai. Būtent tai buvo atlikta anksčiau minėtais eksperimentais.

IŠVADOS

1. Sukurta skaičiavimo metodika, padedanti optimaliai surinkti pjezoelektrinių elementų aukštesniųjų virpesių modų generuojamą energiją. Ištirtas generuojamos energijos pasiskirstymas generatoriaus pjezoelektriniame elemente. Taikant sukurtą skaičiavimo metodiką ir pasitelkus energijos pasiskirstymo tyrimo rezultatus apskaičiuotas keitiklio normalinių

deformacijų mazginis taškas, leidžiantis padidinti generuojamos energijos kiekį 7,2 %.

2. Sudarytas virpesių energijos generatoriaus pjezoelektrinių grandžių netiesinio dinaminio kontakto matematinis ir skaitinis modeliai. Modeliai taikyti generatoriaus, žadinamo kinematinio ir vibrosmūginio poveikiu, fizikinės elgsenos tyrimui.
3. Sukurtas susietasis pjezoelektrinės grandinės su elektrine apkrova modelis. Modelį ištyrus skaitiniais metodais buvo pagrįsta, kad jis tinka skirtingų pjezoelektrinių elementų jungimo būdų įtakai generatoriaus dinaminėms bei elektrinėms savybėms vertinti.
4. Nustatyti pjezoelektrinių elementų netiesinės dinaminės kontaktinės sąveikos mechaniniai ir elektriniai parametrai, darantys įtaką generuojamos energijos kiekiui. Taikant sukurtą žemadažnio rezonatoriaus (ŽR) ir aukštadažnio pjezoelektrinio virpesių energijos keitiklio (PVEK) BE modelį, apskaičiuota, kad tandemas veikia efektyviausiai, kai kontakto vieta yra 0,2–0,3 L atstumu nuo laisvojo PVEK galo. Tokiu atveju generuojama apie 150 % daugiau energijos nei smūgiuojant į keitiklio laisvąjį galą (0 L). Tai galima aiškinti tuo, kad smūgiuojama į tašką, kuris atitinka keitiklio antrosios tikrinių skersinių virpesių modos poslinkių mazginį tašką, tokiu būdu sužadinant aukštesniąsias skersinių virpesių modas, generuojančias kur kas daugiau deformacijų ir kartu daugiau energijos.
5. Sudarytas pjezoelektrinio elemento geometrinės formos, maksimizuojančios generuojamos energijos kiekį, optimizavimo uždavinio matematinis ir skaitinis modeliai. Rasta optimali keitiklio geometrinė forma, atliktas optimalios formos keitiklio dinamikos tyrimas. Optimalios geometrinės formos keitiklio generuojamų deformacijų kiekis padidėjo 49 %, normalizavus šį dydį dažnio atžvilgiu – 16 %, palyginti su pastovaus skerspjuvio ploto keitikliu.
6. Sukurtos metodikos ir eksperimentiniai standai, skirti anksčiau aprašytiems modeliams eksperimentiškai patikrinti. Atlikus eksperimentinius tyrimus, galima daryti šias išvadas:
 - 6.1. Deformacijų mazginio taško skaičiavimo metodas patikrintas eksperimentiškai. Eksperimentiškai nustatyta, kad keitiklis, segmentuotas deformacijų mazginiame taške, gautame pereinamųjų procesų analizės metu, generuoja 5,5 % didesnę elektrinę įtampą nei keitiklis, segmentuotas deformacijų mazginiame taške, gautame modų analizės metu.
 - 6.2. Eksperimentiškai įrodyta elektrinės apkrovos dydžio, taip pat ŽR ir PVEK dinaminio kontakto vietos įtaka tandemo generuojamos elektrinės galios dydžiui. Geriausi rezultatai užfiksuoti dinaminio kontakto vietai esant antrosios skersinių virpesių modos deformacijų mazginiame taške su 29,5 kΩ elektrine apkrova.

- 6.3. Eksperimentiškai nustatytas ryšys tarp ŽR ir PVEK tikrinių dažnių santykio $\omega_1^P/\omega_1^{\dot{Z}R}$ ir tandemo generuojamos elektrinės galios. Geriausi rezultatai gauti, kai $\omega_1^P/\omega_1^{\dot{Z}R} = 8$. Tai galima aiškinti tuo, kad kuo didesnė rezonatoriaus energija – tuo daugiau jos perduodama į pjezoelektrinių generatorių.

LITERATŪRA

1. SUHAIMI, K., R. RAMLAN, and A. PUTRA. A Combined Softening and Hardening Mechanism for Low Frequency Human Motion Energy Harvesting Application. *Advances in Acoustics and Vibration*. 2014, ID 17032, 13 p. Prieiga per doi: 10.1155/2014/217032
2. YANG, B., C. LEE. Non-resonant Electromagnetic Wideband Energy Harvesting Mechanism for Low Frequency Vibrations. *Microsystem Technologies*. 2010, 16, 961–966. Prieiga per doi: 10.1007/s00542-010-1059-z
3. ZHU, D. Vibration Energy Harvesting: Machinery Vibration, Human Movement and Flow Induced Vibration. *Sustainable Energy Harvesting Technologies – Past, Present and Future*. 2011, 25–54.
4. BEEPY, S., N. WHITE. Energy Harvesting for Autonomous Systems. *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2012, 6, Issue 1.
5. DESPESE, G., T. JAGER, J. CHAILLOUT, J. LEGER, A. VASSILEV, S. BASROUR and B. CHALOT. Fabrication and Characterisation of High Damping Electrostatic Micro Devices for Vibration Energy Scavenging. *Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP 2005)*. June 1–3, 2005, Montreux, Switzerland. TIMA, 386–390.
6. ERTURK, A., P. A. TARAZAGA, J. R. FARMER, and D. J. INMAN. Effect of Strain Nodes and Electrode Configuration on Piezoelectric Energy Harvesting from Cantilevered Beams. *Journal of Vibration and Acoustics*. 2009, 131, 011010-1–011010-11.
7. SIROHI, J., I. CHOPRA. Fundamental Understanding of Piezoelectric Strain Sensors. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2000, 11, 246–257.
8. REZAEISARAY, M., M. EL GOWINI, D. SAMEOTO, D. RABOUD, and W. MOUSSA. Low Frequency Piezoelectric Energy Harvesting at Multi Vibration Mode Shapes. *Sensors and Actuators*. 2015, 228, 104–111.
9. BUCCIARELLI, L. L. *Engineering Mechanics for Structures*. Chapter 8. Mineola, NY, USA: Dover Publications, 2009, p. 306.
10. ERTURK, A., D. J. INMAN. On Mechanical Modeling of Cantilevered Piezoelectric Vibration Energy Harvesters. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2008, 19, 1311–1325.
11. HAEBERLIN, A. et al. The First Batteryless, Solar-powered Cardiac Pacemaker. *Heart Rhythm*. 2015, 12 (6), 1317–1323.
12. ROUNDY, S., P. WRIGHT, and K. PISTER. Micro-Electrostatic Vibration-to-Electricity Converters. *Proc. American Society of Mechanical Engineers International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. 2002-34309, New Orleans, LA, November 17–22, 2002.

13. ZHU, D., M. J. TUDOR, and S. P. BEEBY. Strategies for Increasing the Operating Frequency Range of Vibration Energy Harvesters: A Review. *IOP J. of Measurement Science and Technology*. 2010, 21.
14. WU, X, J. LIN, S. KATO, K. ZHANG, T. REN and L. LIU. A Frequency Adjustable Vibration Energy Harvester. *Proc. PowerMEMS 2008+ microEMS2008*. 9–12 November 2008, Sendai, Japan, 245.
15. BENDAME, M., E. ABDEL-RAHMAN, and M. SOLIMAN. Electromagnetic Impact Vibration Energy Harvesters. *Springer Proceedings in Physics*. 2015, 168. Prieiga per doi: 10.1007/978-3-319-19851-4_2
16. SCHEIBNER, D., et al. Characterization and Self-Test of Electrostatically Tunable Resonators for Frequency Selective Vibration Measurements. *Sensors and Actuators A*. 2004, 111, p. 93–99.
17. ADAMS, S. G., et al. Capacitance Based Tunable Micromechanical Resonators. *8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX*. Stockholm, Sweden, 1995, 438–441.
18. ROUNDY, S., P. K. WRIGHT, and J. M. RABAEY. *Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks with Special Focus on Vibrations*. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers, 2004.
19. BLEVINS, R. D. *Formulas for Natural Frequency and Mode Shape*. Malabar, FL: Krieger Publishing Company, 2001.

AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS

Straipsniai, paskelbti Mokslinės informacijos instituto duomenų bazės „ISI Web of Science“ leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą

1. D. Žižys, R. Gaidys, V. Ostaševičius, R. Daukševičius, V. Daniulaitis. Segmentation of Vibro-Shock Cantilever-Type Pjezoelectric Energy Harvester Operating in Higher Transverse Vibration Modes // *Sensors* 2016, 16 (1), 11; doi:10.3390/s16010011
2. D. Žižys, R. Gaidys, V. Ostaševičius, B. Narijauskaitė. Vibro-Shock Dynamics Analysis of a Tandem Low Frequency Resonator-High Frequency Piezoelectric Energy Harvester // *Sensors* 2017, 17 (5), 970; doi:10.3390/s17050970

Pranešimai tarptautinėse konferencijose

1. D. Žižys, R. Gaidys, V. Ostaševičius. *International conference "Mechanika 2014"*. Optimal Shape Piezoelectric Energy Harvester Design.
2. D. Žižys, R. Gaidys, V. Ostaševičius. *International conference "Mechanika 2016"*. Electric Power Output Maximization for Piezoelectric Energy Harvester by Optimizing Resistive Load.
3. D. Žižys, R. Gaidys, V. Ostaševičius. *Respublikinis XXIV Lietuvos skaičiuojamosios mechanikos asociacijos seminaras*. Geminio energijos generatoriaus formos optimizavimo uždavinio matematinis modelis.

4. D. Žižys, R. Gaidys, V. Ostaševičius, B. Narijauskaitė. *International conference "Mechanika 2017"*. Maximization of energy harvesting from vibrations.
5. D. Žižys, R. Gaidys, V. Ostaševičius. *"Mechanika 2016": Proceedings of the 21st international scientific conference*. Effect of piezoelectric layer segmentation methods on bimorph cantilever energy output, 2016. p. 314–316.

Trumpai apie autorių

Darius Žižys gimė 1988 m. rugsėjo 16 d. Kaune. 2007 m. baigė Ukmergės Jono Basanavičiaus vidurinę mokyklą ir pradėjo studijas Kauno technologijos universiteto Tarptautinių studijų centre. Jame 2011 m. įgijo mechanikos inžinieriaus bakalauro laipsnį, o 2013 m. – mechanikos inžinieriaus (specializacija – mikrosistemų inžinerija) magistro laipsnį. 2013–2017 m. buvo Kauno technologijos universiteto doktorantas.

El. Pastas: darius.zizys@yahoo.com

RESUME

Aim of the work and objectives of the thesis

The aim of this research is to analyze and develop different piezoelectric vibration energy harvester power output maximization techniques taking advantage of higher vibration modes and ensuring its operation at varying mechanical excitation conditions.

To achieve the aim of the work several **objectives** are formulated.

1. To develop a methodology for calculation of segmentation location of piezoelectric material layers to maximize the energy output from energy harvesters operating at higher transverse vibration modes, to investigate distribution of energy in the active element.
2. To develop mathematical and numerical models for nonlinear dynamic contact of vibration energy harvester's piezoelectric elements, to investigate the behavior of developed models under vibro-impact conditions.
3. Create a coupled piezoelectric-circuit finite element model (CPC-FEM) for piezoelectric energy harvester enabling prediction of its power output at different dynamic conditions while operating at harmonic excitation conditions at non-impacting and vibro-impacting modes.
4. To determine mechanical and electrical parameters of the piezoelectric elements' nonlinear dynamic contact interaction applying investigated methods and also to analyze their impact on effectiveness of the harvester.

5. To develop mathematical and numerical models for optimization problem of piezoelectric vibration energy harvester maximizing harvested energy, to perform analysis of obtained results and experimentally verify results obtained from the created models.

Investigation methods

Investigation is performed using advanced numerical and experimental methods and equipment which is also presented in the literature, models of piezoelectric vibration energy harvesters are created using FE method. Models were used for development of methodology used for determining the best segmentation point of piezoelectric elements on piezoelectric vibration energy harvester operating in higher transverse vibration modes, investigation of nonlinear dynamic contact interaction of piezoelectric elements, shape optimization of piezoelectric energy harvester. For processing of numerical and experimental results methods of numerical differentiation, integration and Discrete Fourier Analysis were used. To perform the calculations of the FE models COMSOL Multiphysics software was used and for mathematical calculation – MATLAB software.

Statement of novelty

1. A novel calculation methodology was proposed and implemented for identification of optimal segmentation location (coincides with normal strain node) of piezoelectric elements for devices operating in second or higher transverse vibration modes. Up to 7% increase in generated open circuit voltage was achieved.
2. Optimal geometric and electrical parameters of frequency-up converting piezoelectric vibration energy harvester operating under highly nonlinear dynamic contact vibro-impact excitation were identified, increasing harvesters generated power output up to 150%. It was found that the highest power output is achieved if the dynamic contact location coincides with the transverse displacement nodal point of harvester operating in second transverse vibration mode shape.
3. Applying mathematical optimization method implemented methodology of piezoelectric vibration energy harvester geometrical shape optimization, which enabled an increase of its efficiency by 16%.

Practical value

During the work, specific finite element models and calculation methodologies were created that can be used for very relevant and advanced investigation of vibro-impact contact process dynamic in piezoelectric vibration energy harvesters and determining harvester's optimal parameters, which enables cost reduction of experimental and theoretical investigations. These models can

also be applied for mechanical interaction synthesis of energy harvesters utilizing different transduction mechanisms.

Structure and volume of the work

The thesis consists of introduction, four sections and conclusions, list of 105 references and list of authors' publications on dissertation topic. The total volume of the dissertation is 87 pages, containing 93 figures and 16 tables.

CONCLUSIONS

1. A novel methodology was developed for optimal harvesting of generated energy from piezoelectric material operating at higher vibration modes. Distribution of normal strain in the piezoelectric material layer was investigated using transient analysis. Using the developed methodology and numerical results of normal strain distribution the normal strain nodal point was calculated for the harvester operating at second transverse vibration mode, ensuring a 5.2% and 5.5% increase in harvested energy for constant cross-section and optimal shape cantilevers respectively, if compared to results obtained when segmenting the cantilever at normal strain nodal point obtained from modal results.
2. Mathematical and numerical models of nonlinear dynamic contact of piezoelectric vibration energy harvester elements were created. Developed models were used for investigation of harvester's physical behavior under kinematic and vibro-impact excitation.
3. Coupled model of piezoelectric device with electrical load attached was developed. Models eligibility for practical calculations of dynamical and electrical properties of the piezoelectric elements connected in parallel and series was checked investigating the modelling results using numerical methods. The size of the optimal resistive load needed for series connection is 77% lower than for parallel connection, even though the power output is similar.
4. Mechanical and electrical parameters of nonlinear dynamic contact between different piezoelectric elements maximizing the energy output of such device were determined. Using the developed FE model of the low frequency resonator (LFR) and piezoelectric vibration energy harvester (PVEH) it was found that the transducer is the most efficient when the location of the dynamic impact point which is at 0,2 – 0,3 L distance from the tip of the cantilever, this allows up to 150% greater RMS power output, if compared to LFR impacting to the tip of PVEH (0L). This might be explained by stating that the location of the dynamic contact roughly coincides with the location of the displacement node point for the second

mode shape of the cantilever generating higher mode shapes which generate significantly higher amount of strain and thus energy.

5. Mathematical and numerical models of shape optimization problem, maximizing the amount of generated normal strain were developed. Solving the shape optimization, the peak output of normal strain was increased by 49% of the active harvester's element and after adopting criterion of effectiveness normalizing the amount of normal strain with respect to excitation frequency the increase of normal output was 16% if compared to energy output from constant cross-section cantilever.
6. Methodologies and experimental stands were developed for experimental verification of described mathematical and numerical models. After conducting the experiments following conclusion can be done:
 - 6.1. Methodology for calculation of normal strain nodal point was checked experimentally. It was experimentally determined that a harvester segmented at strain nodal point obtained from transient analysis generated 5.5% higher voltage output in comparison to voltage output obtained from the harvester segmented at nodal point obtained from modal analysis.
 - 6.2. Effect of electrical load's size and location of dynamic contact on the amount of tandems' generated power was experimentally investigated and proven to be in a good agreement with the modeling results, the error does not exceed 8%. The best results were obtained when the location of dynamic contact coincided with the displacement nodal point of the second transverse vibration mode.
 - 6.3. Relation between the frequency ratio of LFR and PVEH natural frequency ω_1^P/ω_1^{LF} and tandem's generated power was experimentally determined. The best results were obtained when the frequency ratio $\omega_1^P/\omega_1^{LFR}$ was equal to 8. It can be explained by the fact that the higher the amount of energy the LFR is carrying, the more of that energy can be usefully transferred into the piezoelectric generator.

UDK 681.586.773(043.3)

SL344. 2018-03-29, 2 leidyb. apsk. I. Tiražas 50 egz.

Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas

Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas